

文章编号: 1000-1301(2009)03-0084-11

汶川大地震公路桥梁震害初步调查

王东升¹, 郭 迅², 孙治国¹, 孟庆利², 于德海¹, 李晓莉¹

(1. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 2008 年 5 月 12 日我国四川省汶川县发生 8 级大地震, 造成大量公路桥梁破坏。本文详细介绍了百花大桥、小鱼洞大桥、庙子坪大桥、龙尾大桥等 9 座典型公路桥梁的震害情况及原因。这个地区的桥梁主要为桥面连续简支梁桥, 支座多为直接搁置的板式橡胶支座, 地震中稳定性较差, 主梁与桥墩连接较为薄弱, 更多地发生横、纵向移位, 乃至最终落梁。这种薄弱连接一定程度上降低了桥墩的地震荷载, 总体上看桥墩震害较轻, 但从破坏的桥墩、拱肋、盖梁来看, 直接剪切或形成弯曲塑性较后的剪切破坏较为多见。提出了公路桥梁抗震设计若干建议, 涉及桥台抗震稳定性及强度校核、曲线梁桥和高墩桥梁设计、支座及防落梁措施设计、桥墩及构件延性设计、场地液化等多个方面。强调了抗震构造措施能够维持公路桥梁大震后应急通行功能的“最强设计原则”。

关键词: 汶川地震; 公路桥梁; 震害; 抗震设计

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A

Damage to highway bridges during Wenchuan Earthquake

WANG Dongsheng¹, GUO Xu², SUN Zhiguo¹, MENG Qingli², YU Dehai¹, LI Xiaoli¹

(1. Institute of Bridge and Road Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: The great Wenchuan earthquake ($M=8.0$) occurred on May 12, 2008 in Sichuan Province of China and caused damage to many highway bridges. A description of the damage and the probable causes are presented for nine bridges including Bahua Bridge, Xiaoyudong Bridge, Miaozping Bridge and Longwei Bridge. Almost all highway bridges in the area affected by the earthquake are simply supported continuous girder bridges with rubber bearing placed on the cap beam directly and the connections between bridge columns and girders are weak. This caused the bridge girders to slide laterally or longitudinally and even to fall under earthquake actions. The poor bearing conditions also led to the decrease of seismic loads carried by bridge columns and the damage to bridge columns was not severe, but some induced the damage to columns, arch ribs or cap beams due to shear or combining shear and flexure. Based on the lessons learned from the Wenchuan earthquake, recommendations on the seismic design of highway bridges are presented including stability and strength calculation of bridge abutments, design of curved bridges and bridges with high piers, design of bearings and devices preventing the girders from falling down, ductility of bridge columns and other structural members and site liquefaction. For performing the emergency function of the bridge, it is emphasized that attention should be paid to the structural details design to avoid collapse when an unexpected large earthquake occurs.

Key words: Wenchuan Earthquake; highway bridge; seismic damage; seismic design

收稿日期: 2008-09-25 修订日期: 2008-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50878033, 50808163); 地震行业科技专项项目 (200808021); 中央级公益性研究所基本科研业务费专项 (2006B06); 中国地震局工程力学研究所开放试验室基金 (2007A06)

作者简介: 王东升 (1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震研究。E-mail: dswang@newmail.djnu.edu.cn

引言

2008年 5月 12日我国四川省汶川县发生 8级大地震,造成大量人员伤亡,举国同悲。同时因滑坡及泥石流阻塞、桥梁倒塌及公路损毁使震中区交通运输完全中断,给抗震救灾带来了极大困难,突显生命线工程重要性。

为更好地认识地震对公路桥梁的影响及破坏规律,为灾区交通系统恢复重建和国内桥梁抗震设防、抗震设计、抗震加固等工作提供技术支持,中国地震局工程力学研究所科研人员在地震发生后即奔赴现场开展救援及桥梁震害调查工作,主要调查对象为 213国道百花大桥和都汶高速公路接近完工的庙子坪大桥和新房子大桥。

2008年 8月项目组又对震区桥梁震害进行了较详细调查,共调查桥梁 20余座。主要包括 213国道映秀镇岷江大桥至寿江大桥间所有桥梁; S105国道平武县南坝大桥;位于北川县城的龙尾大桥以及位于成都彭州的小鱼洞大桥;位于都江堰虹口的高原大桥;位于映秀镇的高树大桥(岷江新建桥)。

图 1 为地震区交通分布情况。调查范围基本涵盖了汶川大地震主发震断层:映秀—北川断裂下盘区域。



图 1 地震区交通分布及桥梁震害调查主要区域

Fig 1 Survey scopes of damaged bridges in Wenchuan Earthquake

1 典型公路桥梁震害

1.1 百花大桥

百花大桥为曲线连续梁桥+直线连续梁桥+曲线连续梁桥的组合形式,平面呈“S”形。墩梁采用无盖梁支撑,主梁直接置于柱顶,距震中映秀镇或主发震断层(映秀—北川断裂)约 2—3 km。主要震害为 5 跨曲线梁整体性跨塌(图 2(a)和图 2(b)),部分梁体折断并叠置(图 2(c))。其它震害情况包括:桥墩弯曲破坏(图 2(d))和桥墩剪切破坏(图 2(e));桥墩系梁节点剪切破坏(图 2(f))或节点处桥墩形成塑性铰(图 2(g));软弱场地土层沉陷及向河心滑移导致桩基础变位、倾斜(图 2(h));主梁横、纵向移位及碰撞和挡块震坏(图 2(i)、图 2(j))。

百花大桥地震破坏原因为:(1)悬臂端或盖梁支座支承长度不足且缺少纵向、竖向限位装置;(2)桥址处新近沉积软土发生沉陷并带动桩基整体向河心滑移,且基础转动位移被高墩放大;(3)强烈地震动效应使曲

线主梁脱离最外侧桥墩支承, 最终发生落梁坍塌并致桥墩损毁, 最先落梁跨似在远离映秀镇侧; (4) 桥墩底部塑性铰区配箍率偏低 (现场测量为 $\phi 8@150$) 使抗剪能力不足; (5) 桥墩系梁节点设计不当, 正确的做法是应使塑性铰形成于梁端而桥墩、节点保持弹性 (图 2(k))。



图 2 百花大桥震害
Fig 2 Damage to Baihua Bridge

1.2 小鱼洞大桥

小鱼洞大桥为 4 跨刚构 (肋拱) 桥, 位于较宽阔的河漫滩场地且存在砂土液化 (图 3(a))。一次生发震断层在该桥北侧 (远离小鱼洞镇侧) 近似以 75° 左右交角穿过, 距离北侧桥台 20 余 m (涵洞处), 路面隆起 (图 3(b))。小鱼洞桥位于上盘。主要震害为: 南侧起 2 跨整体坍塌 (图 3(c)), 桥墩倾斜并基础破坏 (图 3(d)); 第 3 跨基本完好, 个别桥墩有轻微开裂; 第 4 跨的拱圈 (肋) 在拱脚处、腹杆在顶部节点处剪切破坏, 桥面塌陷 (图 3(e)、图 3(f)、图 3(g)、图 3(h)、图 3(i)、图 3(j)), 桥墩基本完好。桥梁两侧桥台翼墙均有开裂、倾斜, 胸墙撞裂, 桥台整体变位不明显 (图 3(k)); 其它主梁伸缩缝处无碰撞迹象。

小鱼洞大桥震害原因可归纳为 3 点: 一是结构设计缺陷: 拱肋和腹杆配箍偏低以致抗剪能力不足, 为 $\phi 6@200$ 且为单肢, 无加密区、无 135° 弯钩及嵌固于混凝土之内 (图 3(l)); 纵筋保护层 $3\text{ cm} \sim 5\text{ cm}$ 不等且在拱脚处部分截断, 以绑焊接相连, 这些都会导致黏结不足 (图 3(m))。图 3(n) 清晰展示了拱肋的破坏模式及薄弱环节: 其垂直 (拱肋) 向裂缝为弯曲、斜向裂缝为剪切、沿纵筋方向则为黏结。二是场地液化很可能是桥墩倾斜及基础破坏的重要诱因。三是断层附近强烈地震动及地表破裂 (位移) 影响, 因未作详细量测尚难具体界定。此外还有一点需要指出, 该桥在地震作用下传力路径很不明确, 腹杆和拱肋无协同工作, 同为单道防线。

1.3 都汶高速公路庙子坪大桥

庙子坪大桥横穿紫坪库水库, 地震时接近完工。主桥为 3 跨连续刚构桥, 引桥为 50 m 跨连续桥面简支梁桥, 5 跨一联设有伸缩缝。该桥桥墩高度在百米以上。主要震害为一跨引桥在伸缩缝处坠落 (图 4 (a)) 和主、引桥横向稍有错位 (图 4 (b))。其它震害现象为主桥、引桥支座破坏和挡块损坏 (图 4 (c)、图 4 (d)、图 4 (e)、图 4 (f)); 主桥和引桥、引桥与引桥伸缩缝处的碰撞, 主要发生在扶手、护栏和隔离带处 (图 4 (g)、图 4 (h)、图 4 (i)) 从其破坏情况看, 碰撞远比想象要复杂得多。特别观察了桥墩高度相近引桥伸缩缝处的碰撞情况, 因恰巧位于落梁处, 另侧非落梁跨未见明显碰撞痕迹 (图 4 (j))。



(a) 桥址处砂土液化



(b) 次生断层75度左右交角从涵洞处穿过



(c) 南侧2跨整体坍塌



(d) 桥墩倾斜, 基础破坏



(e) 北侧2跨的整体破坏形态



(f) 北侧第1跨肋拱、腹杆剪切破坏



(g) 腹杆顶部节点剪切破坏
(北侧第1跨)



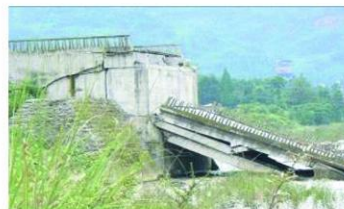
(h) 腹杆顶部节点剪切破坏
(南侧第2跨倒塌)



(i) 拱圈(肋)的剪切破坏
(北侧第1跨)



(j) 拱圈(肋)的剪切及黏结破坏
(南侧第2跨倒塌)



(k) 南侧桥台翼墙开裂、倾斜
和胸墙撞裂



(l) 拱肋节点处的箍筋构造



(m) 纵筋节点处绑焊接



(n) 拱肋地震破坏模式及薄弱环节

图 3 小鱼洞大桥震害

Fig 3 Damage to Xiaoyudong Bridge

道跨线桥横向挡块震坏来看(图 4(k)), 此处地震动以沿庙子坪大桥纵桥向为主。其震害原因一是高墩柔性对位移反应的放大作用; 二是上部结构较宽、较高且质量很大(双向四车道高速公路桥梁), 较大惯性力反应及平动、摇摆更易导致支座、挡块损坏, 进而引发落梁。此外, 桥墩损伤情况目前不详, 有消息说水中桥墩发生了开裂(目前已修复)。还有一个猜测是一次生断层自庙子坪大桥落梁跨处通过, 因其附近的龙洞子隧道发生震害, 疑为断层穿过导致, 此点仍有待进一步验证。主桥与引桥间的横向错位产生机制也有待进一步调查确认。



(a) 庙子坪大桥引桥落梁



(b) 庙子坪大桥主桥与引桥错位



(c) 落梁处支座、挡块破坏情况



(d) 主桥支座及垫块损坏图



(e) 引桥支座移位及挡块损坏



(f) 主桥挡块破坏, 缓冲垫脱落



(g) 扶手碰撞



(h) 护栏碰撞



(i) 隔离带碰撞



(j) 落梁跨远端情况



(k) 庙子坪大桥上 213 国道跨线桥震害

图 4 庙子坪大桥震害

Fig 4 Damage to Miaozhiping Bridge

1.4 龙尾大桥

龙尾大桥位于北川县城(图 5(a)), 为 11 跨桥面连续简支梁桥, 双柱式桥墩, 有盖梁。主发震断层沿北东向斜穿过北川县城, 该桥距断层不足几百米, 该桥位于上盘。北川县城位于宽阔的河谷地带, 龙尾大桥桥址处场地液化(图 5(b))。

龙尾大桥震害主要表现为: 主梁横向、纵向移位, 横向距离可达 2 m 以上, 挡块毁坏, 部分主梁落梁; 因横向移位不同, 桥面纵向呈弯曲状, 同时主梁一端脱离支座及垫块, 桥面高低错落(图 5(c)、图 5(d)、图 5(e)); 远离北川的第 7 跨桥墩显著倾斜接近倒塌, 目前已被唐家山堰塞湖泄洪后冲垮(图 5(f)、图 5(g)); 临近倒塌跨的双柱墩顶部形成了弯曲塑性铰, 个别盖梁有斜向剪切裂缝(图 5(h)、图 5(i)); 桥台(北川岸)总体无移位, 但翼墙已横向撞裂, 胸墙可能撞碎, 主梁顶入路面近 2 m 隆起(图 5(j))。

龙尾大桥破坏原因主要为近断层强烈的横、纵桥向的地震动效应, 第 7 跨桥墩倾斜及接近倒塌为场地液化所致。

1.5 高树大桥

高树大桥位于映秀镇, 平行于岷江建造, 目前处于施工中, 已部分完成了桥面连续路面配筋构造。主发震断层从该桥跨涵洞处几乎垂直穿过沿山谷走向, 导致左侧桥孔首先落梁。此后左侧各孔发生连锁性倒塌, 倒塌的桥墩压在主梁之上 (图 6(a)、图 6(b)、图 6(c))。说明落梁破坏在先, 倒墩在后。此外, 桥址岸坡滑移导致挡土墙与桥墩抵紧。个别桥墩顶部发生弯剪破坏 (图 6(d))。

高树大桥破坏的主要因素为桥梁不能适应很大的断层地表位移而首先发生落梁。断层地表位移从附近涵洞小桥处估计竖向接近 50 m, 水平接近 100 m, 对岸侧断层地表隆起更是高达 2 m 以上。

高树大桥可认为是大陆首例因断层穿过而产生落梁震害桥梁。



(a) 地震前的北川县城
(最远端为龙尾大桥, 网络照片)



(b) 龙尾大桥桥墩液化
(考虑泄洪推断为余震液化)



(c) 主梁横向移位, 挡块撞碎



(d) 主梁纵向移位, 脱离支座



(e) 桥面弯曲, 高低错落



(f) 第7跨桥墩倾斜接近倒塌
(近端第2跨墩底可见喷砂现象)



(g) 第7跨桥墩冲毁
(唐家山泄后即目前所见情况)



(h) 桥墩顶部横向弯曲塑性铰
(最右侧桥墩)



(i) 盖梁的剪切裂缝



(j) 桥台破坏情况

图 5 龙尾大桥震害

Fig 5 Damage to Longwei Bridge

1.6 高原大桥

高原大桥为 4 跨桥面连续简支梁桥, 位于虹口高原村。主发震断层自其高原村一侧约几百 m 处通过 (图 7(a))。

高原大桥总体破坏为主梁整体沿纵向桥向向高原村一侧滑移, 在第 3 跨处墩梁相对位移达到最大以致落梁 (图 7(b)、图 7(c))。高原村一侧桥台胸墙撞碎并被顶入路基 50 m 以上, 路面隆起, 桥台翼墙倒塌; 另侧桥台基础有滑动迹象, 桥台前墙严重破坏并向高原村一侧倾斜, 位移在 15 m 左右 (图 7(d)、图 7(e))。横桥向挡块撞碎。未落梁跨桥墩基本完好, 稍倾斜。

高原大桥破坏的主因是桥台, 特别是胸墙薄弱导致主梁纵向位移失控。前述龙尾大桥也有这方面因素。

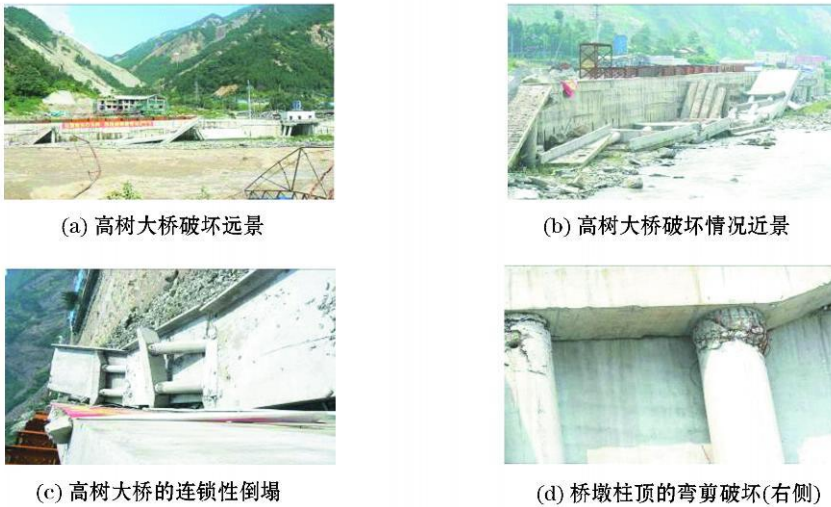


图 6 高树大桥震害

Fig 6 Damage to Gao Shu Bridge



图 7 高原大桥震害

Fig 7 Damage to Gao Yuan Bridge

1.7 南坝大桥(新)

南坝大桥位于平武县南坝镇,与发震断层的距离不详。该桥为多跨、简支斜交桥,双柱式桥墩,尚处于施工中,已完成主梁架设。桥梁震害主要是主梁横向移位、落梁(图 8(a)、图 8(b));支座移位(图 8(c)、图 8(d));桥墩顶部受压钢筋屈曲(图 8(e));主梁梁端无碰撞迹象。

震害原因除桥面尚未形成整体外,还强调两点:一是盖梁支承长度对斜交桥宜适当增加,该桥为 70 m,勉强满足抗震规范构造要求;二是支座与主梁、盖梁之间近似“浮放”,在地震中极易移位进而引发落梁破坏。

在南坝大桥上游约 30 m 左右的老南坝大桥(拱桥)震毁(图 8(f))。

1.8 岷江大桥

岷江大桥位于映秀镇 213 国道跨越岷江处,为桥面连续简支梁桥。该桥近似与主发震断层平行,距离百余米,过岷江即为顺河向断层穿过的高树大桥。

主要震害为主梁横向移位,稍有不同的是映秀镇一侧向远离断层方向移位,而另一侧则向断层方向移位,主梁存在扭转(图 9(a)、图 9(b)、图 9(c))。此外,桥梁汶川侧一跨被山体滑坡砸损,主梁全部发生弯曲裂缝,靠断层一侧的边梁被砸断(图 9(d))。补充一点,地震后相关部门对该桥进行了应急修复,对梁体进行了复位处理。文献^[3]提供了更原始的震害介绍及图片。

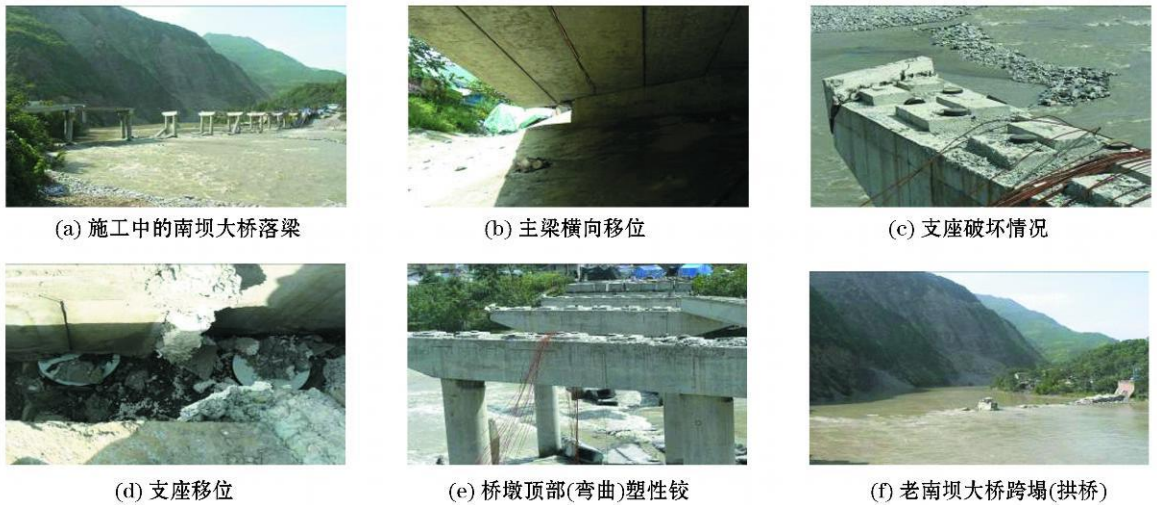


图 8 南坝大桥震害
Fig 8 Damage to Nanba Bridge

震害原因认为是地震动作用与山体滑坡共同作用结果, 地震动使主梁向远离断层方向移位, 而山体滑坡使汶川侧主梁向断层处移位, 从而形成上述震害结果。位于映秀镇的另外 2 座桥梁均向远离断层方向发生了横向整体移位。



图 9 岷江大桥震害
Fig 9 Damage to Minjiang Bridge

1.9 寿江大桥

寿江大桥位于 213 国道接近漩口镇附近, 为桥面连续简支梁桥, 墩高在 40 m 以上 (图 10(a))。该桥主要震害为主梁整体向映秀镇侧纵向滑移, 最边跨接近于落梁, 桥墩轻微开裂 (图 10(b)); 主梁与桥台碰撞, 伸缩缝顶紧; 桥台胸墙与翼墙转角处近似 45° 开裂, 挡块损坏 (图 10(c))。此外, 映秀镇一侧桥台处存在岸坡滑移。

该桥震害原因与高原大桥相近, 只不过桥台胸墙未被撞碎, 因此落梁破坏未发生。寿江大桥距离发震断层较远, 较大的位移反应可能是高墩所致。



(a) 寿江大桥



(b) 边跨接近落梁



(c) 桥台破坏

图 10 寿江大桥震害

Fig 10 Damage to Shoujiang Bridge

2 公路桥梁结构及震害特点

汶川地震区桥梁普遍 7 度设防, 在 8 级大地震强烈近断层地震动效应及断层地表破裂作用下, 桥梁破坏将不可避免地发生。桥梁结构及震害特点总结如下:

(1) 主梁与桥墩连接较为薄弱: 震区桥梁主要为桥面连续简支梁桥, 主梁整体性较好, 支座多采用直接搁置的板式橡胶支座, 地震中稳定性较差。因此主梁更多发生横、纵向移位, 乃至最终落梁。同时这种薄弱连接一定程度降低了桥墩的地震荷载, 总体上看桥墩震害较轻, 但此点并非绝对, 如南坝大桥桥墩震害。



(a) 新房子大桥支座损坏



(b) 主梁在桥台处移位



(c) 主梁伸缩缝处横向错位

图 11 新房子大桥震害

Fig 11 Damage to Xinfangzi Bridge

(2) 桥台具有较好的稳定性: 当地为防止洪水冲刷、滑坡等地质灾害, 桥台设计一般具有很好的稳定性, 桥台基本上未发生大的整体位移, 这在很大程度上保证了中、小长度桥梁的抗震性能。但桥台本身强度验算应加以重视, 主要破坏方式为胸墙直接剪断和 45° 向后开裂。若高原大桥桥台胸墙强度足够, 落梁破坏当不会发生。

图 12 给出了部分代表性桥台设计。



(a) 设有抗滑桩的桥台



(b) 桥台边坡处理



(c) 台后填土滑坡但桥台整体稳定

图 12 代表性桥台设计

Fig 12 Design details of abutment

(3) 桥梁延性抗震存在隐忧: 从破坏的桥墩、拱肋、盖梁来看, 直接剪切破坏或形成弯曲塑性铰后的弯剪破坏现象较为多见, 主要原因是对构件抗剪强度计算重视不够, 配箍率偏低且不满足 135° 弯钩等构造要求。小鱼洞大桥应视为这方面最惨痛的教训。

(4) 防落梁构造措施较为单一: 震区主要防落梁构造措施为横向挡块, 尽管毁损较多, 但在防止横向落梁方面起到了积极作用。可能认为整体桥面构造已经满足规范要求的“简支梁桥纵联”原则, 因此纵向防落

梁措施方面考虑不足,较多桥梁发生纵向落梁。

(5) 场地液化问题有待认识:调查发现小鱼洞大桥场地、龙尾大桥场地均发生了地震液化现象,可能是导致桥墩倾斜、桩基础损坏的重要因素,宜作进一步研究确认。

(6) 百米高墩桥梁接受考验:因上部结构(主梁)质量及尺寸较大,其主要薄弱环节为支座,其次为碰撞。桥墩损伤有待调查。

3 公路桥梁抗震设计建议

结合上述桥梁震害调查工作,针对公路桥梁抗震设计建议如下:

(1) 桥梁桥址选择:场地及地质条件(或经处理后)必须能够确保桥台的整体稳定性;在宽阔河漫滩、山(河)谷修建桥梁时必须重视砂土液化问题。

(2) 曲线梁桥问题:曲线梁桥对山区公路线型仍具有很好的适应性,但应选择小桥长、小跨度、曲线连续梁、双柱墩带盖梁的结构形式。除经详细抗震分析的大型桥梁外不建议采用连续曲线刚构形式,特别是当曲率半径较小时,因地震时桥墩承受复杂的弯、剪、扭共同作用,其破坏风险仍很大。另文介绍的位于绵竹 8 度地震区的回澜立交桥的桥墩震害,足以警示。

(3) 抗震设计问题:宜坚持上部结构与下部结构“弱”连接的设计原则,同时必须加强防落梁措施设计、桥墩与构件延性及细部设计工作。具体为:

支座设计方面:变现有“浮放”为在底部与桥墩锚栓连接。对曲线梁桥、高墩大跨桥梁(类似庙子坪大桥)支座必须仔细校核或专题研究,主梁与桥墩间宜设置竖向拉结锚栓以承受地震可能产生的支座拉力。

防落梁措施方面:横向挡块宜适当加强但不可过刚,配筋必须注意具备足够锚固长度,竖向深入到(盖梁)内部。图 4 (f)破坏的挡块其两个方向的竖向纵筋都因锚固长度不足而未起到相应作用。纵向防落梁措施除继续采用桥面连续做法外,对斜交桥、曲线桥、高墩桥梁在规范基础上应适当增加桥台、盖梁或悬臂端支承长度,可在其边缘设置纵向挡块或在主梁与桥墩间设置拉结措施。桥面连续多跨长筒支梁桥(桥长 200 m 以上或跨数 6 以上)因桥台对其地震纵向位移约束较弱,应特别重视防落梁设计,宜在每一跨(盖梁)处均设置防落梁的纵向挡块,对千米级的特长大桥梁还可在中部伸缩缝处设置倒“T”形、双排桥墩支撑的纵向位移约束平台,以防止因碰撞等造成纵向位移累加。

桥墩及构件设计方面:桥台的胸墙及与翼墙交接处应进行地震时主梁冲击荷载下的强度校核;桥墩及盖梁应注意抗剪强度计算、最小配箍率要求及塑性铰区细部配(箍)筋构造设计,施工中必须强调严禁纵筋在柱脚等关键受力部位的截断或搭接,以切实提高其延性抗震能力;应加强液化场地及软土地基桩基础的抗震能力。上述方面国内桥梁抗震规范仍不很完善,对重要桥梁可考虑“国内规范为主、国外规范为辅”的抗震设计技术方案。

(4) 构造措施最强设计原则:构造措施对保证桥梁在不可预期的“大震”下的抗震能力非常重要,同时其造价相对桥梁总投资又很低廉。因此建议构造措施部分不再依“设防烈度”设计(规范做法)而是采用能够维持桥梁“大震”后应急通行功能的“最强原则”设计。这也可与人类对地震发生时间、地点、强度极其有限的认识水平相适应。

4 存在问题及进一步工作

本次调查工作因受交通等条件制约,主要集中在汶川大地震主发震断层:映秀—北川断裂下盘区域,并侧重于因地震动本身造成损坏的桥梁。对上盘区域桥梁震损情况以及因山体滑坡等地质灾害造成桥梁破坏情况仍有待补充调查。

调查工作主要采用了宏观“定性”观察手段,尚未进行断层地表破裂变形分布、主梁(桥墩)局部位移或倾斜角度、裂缝宽度、桥长及跨度变化、基础破坏开挖等详尽的“定量”量测工作。

调查组成员主要由地震部门和桥梁抗震研究者组成,尽管得到了当地行业主管部门、设计部门的部分配合,但仍缺少必要的相互沟通。必须强调这种沟通对桥梁震害调查的科学性、以及推动桥梁抗震发展的重要意义。

震区若干公路圯拱桥在地震中也发生破坏,因其目前已基本不被采用,项目组仅作简单调查未列入本文。

最后必须说明,同一震害现象可能会有多种解释。本文力图客观介绍桥梁震害情况,而震害的认识仅代表作者们观点,受学识所限难免偏颇,肯请读者批评指正。

致谢: 中国地震局地壳应力研究所陆鸣研究员、中国地震局工程力学研究所孙柏涛研究员和李山有研究员为调查工作提供了极大方便;与同济大学桥梁抗震室李建中教授的交流充实了本文部分内容;构造措施的“最强原则”设计为中国地震局工程力学研究所张敏政研究员观点,作者最初的想法是构造措施在设防烈度基础上“提高 1 度”考虑。在此一并致以谢意。

参考文献:

- [1] JTJ04-89 公路工程抗震设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1990.
- [2] Li J Z, Peng T B, Xu Y. Damage investigation of girder bridges under Wenchuan Earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2008, 7(4): 337-344.
- [3] 李忠献, 韩强. 汶川大地震中山区公路桥梁典型震害及初步分析[C] //汶川地震工程震害调查交流研讨会, 成都, 2008.
- [4] 吉随旺. 5.12 汶川大地震四川公路震害调查分析[C] //汶川地震工程震害调查交流研讨会, 成都, 2008.
- [5] 袁一凡. 汶川地震 15 问[C] //汶川地震工程震害调查交流研讨会, 成都, 2008.
- [6] 洪晓慧. 从汶川地震看桥梁耐震问题与对策探讨[R]. 台湾地震工程研究中心. [Http://http://www.ncree.org](http://www.ncree.org)
- [7] George C. Lee. The 5.12 Wenchuan Earthquake of China—Preliminary Report[R]. [Http://www.mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/China5-12-08/ChinaEQ6-15-08.Pdf](http://www.mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/China5-12-08/ChinaEQ6-15-08.Pdf)